Ueber ein neues Manometer zur Bestimmung kleiner Gasdrucke mit Anwendungen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt

von

Eugen Hering
aus Düsseldorf.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Tübingen
Buchdruckerei von Gg. Schnürlen
1906.

Von der Fakultät angenommen am 29. Mai 1906.

Meinem hochverehrten

Herrn Dr. Alfred Elbers

gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552717_0082

Zweck der Arbeit.

Die Messung des Druckes von Gasen bei sehr kleiner Dichte ist ein Gegenstand, welcher dem Physiker lange Zeit besondere Schwierigkeiten darbot, und auch die exaktesten Methoden, welche neuerdings zur Ausführung gebracht worden sind, lassen an Einfachheit und Einwandfreiheit zu wünschen übrig. Die im folgenden ausgeführte Arbeit behandelt eine neue Art der Druckmessung und mit dieser eine experimentelle Untersuchung eines auf die Anwendbarkeit des Boyle'schen Gesetzes sich stützenden Druckapparates von Professor Mc Leod*). Die Prüfung desselben geschah mittelst dieser neuen, im wesentlichen von Professor Paschen ausgedachten Methode.

Das Prinzip von Mc Leod's Instrument beruht darauf, dass das Gas eines bekannten grösseren Volumens mit dem gesuchten kleinen Drucke auf ein kleineres, ablesbares Volumen mit Hilfe eines messbaren Druckes komprimiert wird. Der gesuchte Druck kann dann einfach nach dem Boyle'schen Gesetze berechnet werden.

Die einzige experimentelle Untersuchung dieses Manometers ist die gemeinsam von E. C. C. Baly und W. Ramsay ausgeführte in ihrer Abhandlung über die Beziehung von Druck, Volum und Temperatur von verdünnten Gasen**). Ein Mittel zur Messung von kleinen Gasdrucken hatten sie indessen nicht, und ihre Untersuchung erstreckt sich auch nur auf Drucke oberhalb 2.5 mm. Sie fanden durch Vergleich mit einem gewöhnlichen

*) Phil. Mag. 48, 110; 1874.

**) Phil. Mag. [5] 38, 314; 1894. Travers, Experimentelle Untersuchung. von Gasen.

Manometer, dass die in Frage stehende Methode in keiner Weise eine Zuverlässigkeit besitzt in Bezug auf die Gase, Luft und Kohlendioxyd, indem p v nämlich um erhebliche Beträge Abweichungen aufweist (im Maximum bis zu 90 Prozent). An der Oberfläche des Glases wurde eine erhebliche Verdichtung ausfindig gemacht, die einen mit der Sorte des Glases variierenden Wert annahm. Die von ihnen benutzten Manometer waren aus englischem Bleiglas verfertigt und hatten durchweg die in Fig. 1 skizzierte Form. Das weite Rohr R, welches in eine enge Kapillare C ausläuft, steht durch das Glasrohr G mit dem Manometer und dem Raume von dem unbekannten Druck, durch das Barometeterrohr B mit dem Quecksilberreservoir H in Verbindung. Durch Heben des Gefässes H wurde in der gewöhnlichen Weise das Gas in die Kapillare komprimiert. Der Niveauunterschied des Quecksilbers in G und C ergab den Überschuss des komprimierten Gases gegen das ursprüngliche. Aus dem letzteren, dem Anfangsvolumen $(C + R)$ und dem Endvolumen in C wurde in der bekannten Weise der Druck nach dem Boyle-schen Gesetz berechnet. Derartige Druckbestimmungen wurden zwischen 650 mm und 2.5 mm ausgeführt. Sie führten zu dem bereits angeführten Ergebnis, nur in Wasserstoff ergaben sich übereinstimmende Werte innerhalb der genannten Druckgrenze; auch war p v hier konstant. Ob indessen auch unterhalb derselben die Leistungsfähigkeit des Mc Leod'schen Instrumentes fortdauert konnten sie aus Mangel an erwähnten Hilfsmitteln nicht nachweisen. Die im folgenden beschriebene Untersuchung erstreckt sich auf Drucke von einem Millimeter abwärts bis zu wenigen Tausendstelmillimetern. Sie behandelt auch das Verhalten in Luft, Wasserstoff und Kohlendioxyd und nimmt weiter besondere Rücksicht auf die Form des Mc Leod-Manometers, speziell die dabei in Anwendung kommenden Kapillarröhren. Im Anschluss hieran folgt eine

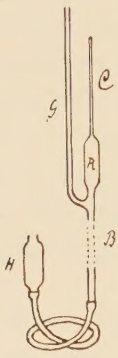

Fig. 1.

eingehendere Prüfung des neuen Manometers in Bezug auf Richtigkeit und Genauigkeit.

Die bisherigen Manometer.

Ein von C. Dieterici *) konstruierter Druckanzeiger besteht aus einer Messingkapsel, deren eine Seite ähnlich wie bei der Einrichtung der Aneroidbarometer durch eine Wellblechmembran gebildet war. Die Ein- und Ausbauchungen, welche diese bei einem von aussen bezw. von innen wirkenden Druck erlitt, wurden durch Spiegelübertragung auf einer Skala sichtbar gemacht. Röntgen verwandte hierzu schon früher einen um eine Achse sich drehenden Spiegel, welcher auf einem auf der Mitte der Wellblechplatte befestigten Stift ruhte. Diese Ruhelage ist aber nach Dieterici veränderlich und damit der Nullpunkt nicht konstant. Die Anwendung von Federn statt der Achse des Spiegels und statt des Stiftes durch Kirchhoff und Hansemann hatten elastische Nachwirkungen zur Folge. Dieterici's Spiegel war deshalb durch einen Faden mit dem Membranzentrum verbunden und wurde mittels einer Feder an seiner Achse gleichmässig gespannt gehalten. Mit dieser Anordnung erhielt er eine Genauigkeit von 0.01 bis 0.005 mm. Später**) verfeinerte er die Methode, indem er statt der Metallmembran und der Kapsel ein auf einen Glastrichter aufgesetztes rundes Glasscheibchen benutzte, dem er durch eine passende Bleibelastung eine bestimmte Nulllage aufzwang. Die Mechanik der Spiegelübertragung blieb dieselbe. Ein Druck von 0.001 konnte mit Sicherheit beobachtet werden; dabei durften aber nur solche Ausbauchtungen der Glasmembran benutzt werden, welche das Bleigewicht hoben; auch waren nur Drucke unterhalb 0.2 mm messbar.

Ein äusserst empfindliches Mittel zwecks Bestimmung sehr

*) W. A. 50, 55; 1893.
**) W. A. 62, 624; 1897.

kleiner Drucke ist die Drucklibelle von Toepler*), die im wesentlichen aus einem sehr schwach geknickten Glasrohr besteht, in welchem sich ein 200—300 mm langer leicht beweglicher Flüssigkeitsfaden befindet. Aus der Verschiebung des Fadens, welche mikroskopisch konstatiert wird, oder der durch eine Elevationsschraube bestimmten Neigung zur Kompensation des Druckes, dem Knickungswinkel des Rohres, der Länge und dem spezifischen Gewicht der Flüssigkeit kann der Druck ermittelt werden. Die grosse Empfindlichkeit, welche 10^{-8} Atmosphäre beträgt, und der kleine Messbereich machen eine Anwendung für Versuche der vorliegenden Art kaum möglich.

Einen anderen Apparat, um kleine Druckdifferenzen messen zu können, haben Thiesen und Scheel**) erfunden. Derselbe besteht aus einem rechtkantigen Eisenblock, in den von oben her dicht neben einander zwei cylindrische Löcher gebohrt sind, die unten durch ein engeres Loch sich verbinden. An der Vorder- und Hinterseite sind Fenster angebracht; die hinteren tragen eine Millimeterskala und zur Bestimmung der Niveaulage des eingefüllten Quecksilbers dienten zwei Mikrometermikroskope. Die Ablesung geschah, indem man durch eine mikrometrische Messung des Abstandes zwischen einem direkt gesehenen und einem in der Quecksilberoberfläche gespiegelten Striche die Lage der Quecksilberoberfläche gegen die Teilung in jeder der beiden Kammern festlegte. Die Genauigkeit ist etwa 0.002 mm.

Grössere Genauigkeit erlangte Lord Rayleigh***), der vor einigen Jahren ein neues Manometer konstruierte, um das Verhalten des Boyle'schen Gesetzes bei kleinen Drucken zu beobachten. Sein Apparat besteht im wesentlichen aus zwei Glaskugeln, deren eine stets Vacuum, die andere den unbekannten Druck einschliesst, und in welche zwei gleichgeformte Glas-

*) W. A. 56, 611; 1895.
**) Wiss. Abh. d. P. T. Rchsanst. III 12 und 76; 1900.
***) Z.S. f. Ph. Ch. 37; 713—734; 1901.

spitzen eingeschmolzen sind. Die beiden Glaskugeln stehen miteinander und mit einem Glasrohr von Barometerlänge in Verbindung, und durch einen verstellbaren Quecksilberbehälter, von dem ein Schlauch zu dieser Röhre führt, kann das Quecksilber in die zwei Kugeln gehoben werden. Eine Druckvorrichtung am Schlauch ermöglicht es, auf feine Berührung des Quecksilbers mit den Glasspitzen einzustellen, was durch eine Lupe oder das blosse Auge konstatiert wird. Wenn der Druck eingelassen ist, kann man durch Drehen einer Schraube das ganze System um eine Achse neigen, welche sich oberhalb der beiden Spitzen befindet. Der Sinus des Drehungswinkels, bezogen auf die Nullage, gibt dann die Niveaudifferenz an. Oberhalb der beiden Glasspitzen ist eine Spiegelplatte angebracht, deren Drehung nach der Poppendorff'schen Methode abgelesen wird. Die Beziehung indessen zwischen der gesuchten Druckdifferenz und der Ablesung selbst ist insofern eine komplizierte, als die letztere sich mit tang 2α, hingegen erstere mit sin α ändert, wenn α der Drehungswinkel ist. Damit der Apparat genau funktioniert muss ferner der Abstand der Spitzen konstant sein, indessen ist ein Verbiegen der Glasteile nach Rayleigh's eigener Ansicht wahrscheinlich, da er bei Drucken über 1.5 mm, also bei stärkeren Neigungen des Apparates immer gewisse Abweichungen erhielt. Der höchste messbare Druck war somit 1.5 mm Quecksilber.

Es ist später noch eine weitere Methode von Edward Morley und Charles Brush*) ausgebaut worden, deren Genauigkeit die des eben beschriebenen Manometers (etwa 0.0005 mm) übertreffen soll (angeblich 0.0001 mm) und die ihr im Prinzip ganz ähnlich ist. Es wurde auch das Messen der Neigung hier nutzbar gemacht. Nur die Ablesmethode ist verfeinert durch Anwendung eines Mikroskopes und zweier schräggestellter Spiegel, welche die beiden Spitzen mit ihren Spiegelbildern dicht neben einander projizierten.

*) Rep. Br. Ass. Gl. 544—546; 1901. Sill. Journ. (4) 13; 455 bis 458; 1902.

Nachteile der Manometer gegenüber der neuen Methode.

So fein die Methoden auch arbeiten mögen, so sind die Apparate doch meistenteils recht komplizierter Art im Vergleich mit dem neuen Manometer. Die vorteilhaftesten Messmethoden sind wohl die beiden zuletzt beschriebenen; aber auch bei ihnen ist trotz der Vollkommenheit die Messung nicht einfach, worauf bei RAYLEIGH's Methode bereits hingewiesen war. Es ist sodann unbedingte Notwendigkeit, dass die beiden Glasspitzen wenigstens annähernd gleichgeformt sind, wie dies auch RAYLEIGH betonte; wenn die Berührung mit einer Lupe oder gar dem blossen Auge beobachtet werden soll. Um das System neigen zu könnnn, müssen weiter sehr lange Glasröhren (ca. 3 m) angewandt werden. Der Abstand der Spitzen, der in der Rechnung einen wichtigen Faktor bildet, ist aller Wahrscheinlichkeit nach nicht konstant, sondern bei stärkerem Neigen ein anderer; denn unter diesen Umständen verlieren RAYLEIGH's Messungen stets ihre Genauigkeit. Es ist RAYLEIGH nicht gelungen, die Variation der Spitzendistanz ausfindig zu machen; aber er wies im besonderen darauf hin, bei jeglichem Apparate derart diesen wahrscheinlichen Fehler ins Auge zu nehmen.

Die neue Methode.

Die neue Methode ist von diesen Einwänden frei. Sowohl die Konstruktion des Apparates wie auch die Messung ist denkbar einfach. Letztere besteht nur in einer Ablesung, ist unabhängig von der Form und dem Abstand der Spitzen und lässt mit Sicherheit Druckmessungen von 0.001 mm bis etwa 40 mm zu. Die Methode der Druckmessung, wie sie Professor PASCHEN dem Verfasser zur Verfügung stellte, ist in Fig. 2 zur Anschauung gebracht.

Der Druck wird als Differenz der Quecksilberniveaus in den weiten Rohrstücken R gemessen, deren eines stets Vacuum,

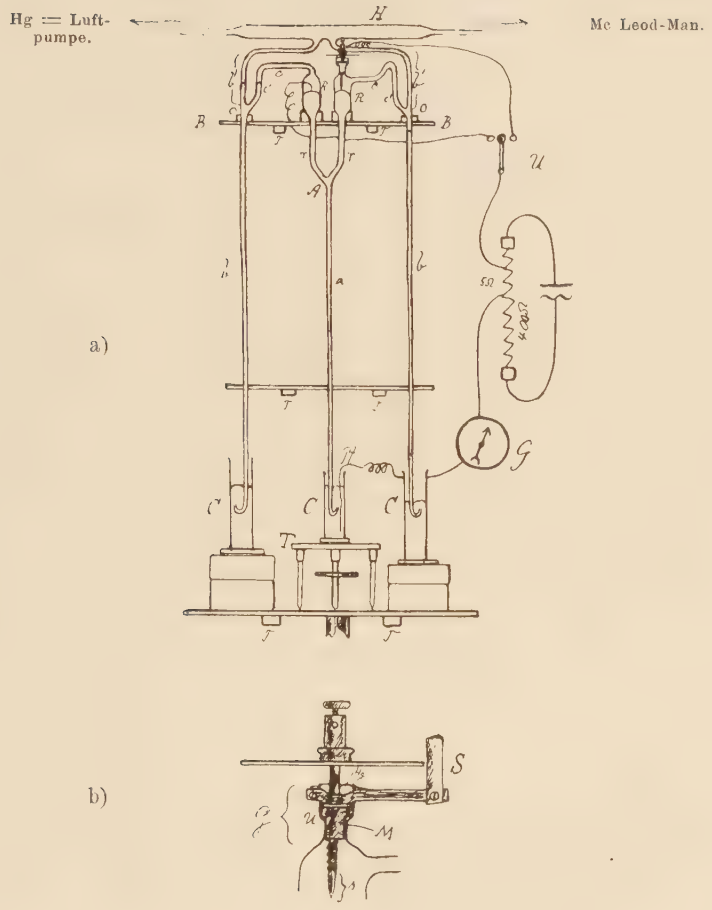

Fig. 2.

das andere den zu bestimmenden Gasdruck enthält. Jedes dieser beiden Rohre läuft nach oben in ein engeres, c, aus, welches nach unten gebogen, bei o in ein Rohr b mündet. Die Rohre b stehen wiederum durch das Hauptrohr H von ca. 20 mm Weite einerseits mit einer Quecksilberluftpumpe, andererseits dem Mc Leod'schen Manometer in Verbindung. Die Rohre b haben Barometerlänge, und die nach unten gebogenen Rohrteile b' und c', welche nach o hinführen, sind so lang, dass für jeden Baro-

meterstand Messungen gemacht werden können. Sie erstreckten sich auf eine Länge von etwa 6 cm, während $b = 78$ cm betrug. Mit ihrem unteren umgebogenen Ende tauchen die Röhren b je in einen mit Quecksilber gefüllten Glascylinder C. Diese Glascylinder können durch untergeschobene Klötze so verstellt werden, dass das Quecksilber in den Röhren b bis zur Gabelung o oder über sie hinaussteigt, in beliebiger Höhe. Durch diese einfachen Barometerverschlüsse zu beiden Seiten des Apparates kann jedes der Rohre R einzeln von der Quecksilberluftpumpe und dem Raume, dessen Druck bestimmt werden soll, abgeschlossen werden; und hierdurch wurden Glashähne entbehrlich gemacht, deren Fettung unerwünscht schien.

Den wichtigsten Teil des Manometers, wo die eigentliche Messung ausgeführt wird, bilden, wie erwähnt, die Rohre R von ca. 25 mm innerer Weite; sie verengen sich unten zu den Röhren r von ca. 7 mm innerer Weite, welche bei A in ein einziges Rohr a desselben Durchmessers übergehen. Dieses taucht wiederum mit dem umgebogenen Ende in ein Glasgefäss C und hat mit den Röhren R Barometerlänge. In das eine Rohr R ist ein Platindraht mit einer feinen Spitze eingeschmolzen, die bei vollständigem Vacuum in diesem Teile das Quecksilber berühren soll. In dem zweiten Rohre R ist eine Mikrometerschraube eingeführt und zwar auf folgende Weise*). Die Mutter M (Fig. 2, b) ist mit einem an Metall und Glas gut haftenden Kitt, der genügend fest, aber nicht spröde ist, so in den Glasansatz G eingekittet, dass nur die Randlinie mit dem Vacuum in Berührung steht. Der Kitt besteht aus Colophonium, Wachs und etwas vulkanisiertem Gummi und gibt äusserst wenig Dampf im Vacuum ab. Darüber folgt eine Quecksilberdichtung, bestehend aus einer Quecksilberschicht von ca. 10 mm Länge. Die Schraubenmutter selbst ist in ihrem unteren Teil 11 mm hoch und 9 mm breit, in ihrem oberen

*) Erfindung von F. Paschen.

3 mm hoch und 11 mm breit und ruht mit diesem breiteren Teile an der Stelle *u* auf dem Glase. Über den weiteren Teil des Glasansatzes ist ein Messingring geschoben, der an einem Arm die Schneide *S* trägt, welche als Fixpunkt bei der Ablesung dient. An ihrem oberen Ende ist auf die gut gefettete Schraube ein Teilkreis mit 250 Partes aufgesetzt. Die Ganghöhe war 0.25 mm, sodass jeder Teilstrich 0.001 mm bedeutete; die 0.0001 mm konnten geschätzt werden, da die Scalenteile einen Abstand von ca. 1 mm hatten. Die Schraube wurde von dem Mechaniker des Tübinger physikalischen Instituts hergestellt und erwies keinen toten Gang. Sie selbst war von Stahl, ihre untere Spitze, *s*, hingegen aus Platin gearbeitet aus einem sich im folgenden erweisenden Grunde. Eine derartige Kontaktablesung haben Boguski und Natanson*) schon bei ihrem Barometer verwendet; die Mikrometerschraube derselben war indessen ganz aus Stahl verfertigt und die Genauigkeit der Einstellung nur 0.01 mm. Es stellte sich bei der Anwendung einer solchen Schraube heraus, dass selbst bei Anlegung einer Potentialdifferenz von $^1/_4$ Volt kein elektrischer Kontakt stattfindet, wenn derselbe optisch konstatiert ist. Die Methode der Einstellung auf Berührung, wie sie von Professor Paschen ausgedacht war, war daher optischer Art, und in der Tat konnte mit Hilfe eines Mikroskopes die Ablesung auf eine Genauigkeit von annähernd 0.001 mm ausgeführt werden. Durch den bereits erwähnten Kunstgriff gelang es dem Verfasser, auch die elektrische Methode zur Anwendung zu bringen und so eine ganz objektive Art der Messung zu bewerkstelligen, ausserdem die Genauigkeit zu erhöhen. Vorzüglichen Kontakt erhielt man nämlich bei Benutzung einer Platinspitze, und in dieser Form wird die Schraube in dem neuen Apparat benutzt. Es bedarf einer besonderen Erwähnung, dass die Spitze sehr fein ausgeführt sein muss. Sie wurde ebenfalls von dem Institutsmecha-

*) W. A. 36, 761; 1889.

niker durch vorsichtiges Polieren mit dem Ölstein hergestellt und auf ihre Feinheit mikroskopisch beobachtet. Falls die Platinspitze einmal den Kontakt versagt, ist sie leicht durch eine momentane Entladung im Vacuum mit Hilfe eines Induktoriums zu reinigen, die Schraube durch Herausnehmen und Abreiben mit Alkohol. Die Genauigkeit wird wesentlich beeinträchtigt durch Erschütterungen von Seiten äusserer Einflüsse, und bei Messung von sehr kleinen Drucken ist es daher gegeben, dieselben während ruhigen Tageszeiten auszuführen. Erhöht werden kann sie aufs drei- bis vierfache durch eine Kompressionsvorrichtung, wie sie bei den späteren Untersuchungen angewandt worden ist. Das Gefäss C, in welches die Röhre a taucht, steht auf einem dreibeinigen Tischchen T. Der eine Fuss desselben trägt auf seiner Achse eine Scheibe, mittels deren seine Länge durch Schraubung verstellt, das Tischchen also leicht geneigt und dadurch das Quecksilber um ein sehr Geringes in den Röhren R gehoben bezw. gesenkt werden kann. Die grobe Einstellung erfolgt durch Nachgiessen von Quecksilber in das Gefäss C, die feine durch die eben beschriebene Handhabung. Zur Erzeugung des für den Kontakt nötigen Stromes wurden von einem Widerstand von 400 Ω, an welchen die Potentialdifferenz von 2 Volt angelegt wurde, 5 Ω abgezweigt, sodass an die Spitzen eine Spannung von $^1/_{40}$ Volt angelegt war. Vermöge des Umschalters U (Fig. 2, a) konnte der Strom in irgend eine der Röhren R durch die Spitze eingeleitet werden; durch den Platindraht Pt, welcher in das mittlere Gefäss C' taucht, ging der Strom weiter vom Quecksilber durch ein Galvanoskop G zum Widerstand zurück. Der ganze Apparat wurde an den Stellen o und unterhalb der Röhren R in Messingringe und -Lager eingekittet, welch letztere auf eine 3 mm dicke Eisenplatte aufgeschraubt waren. Diese Eisenplatte wurde mittelst Bankstiften (T) in eine Wand eingemauert. Eine zweite Eisenplatte hielt unten die Röhren b, a, b, und eine dritte endlich trug die Quecksilbercylinder C. An der Stelle,

wo der verstellbare Fuss des Tischchens stand, war unter dieser Platte eine eiserne Stütze angebracht, die das Nachgeben der Platte beim Drehen an dieser Stelle verhinderte. Um auch den unregelmässigen Einfluss der Körper- und Zimmerwärme zu eliminieren, war der Teil des Manometers, welcher die Röhren R, r enthielt mit einer Wattepackung und einem 2 mm dicken Kupfercylinder umgeben. Die Röhren R, r sind so kurz wie möglich zu halten; sie hatten nur deshalb bei der benutzten Anordnung ihre Länge beibehalten, weil eine Änderung derselben den Aufbau eines ganz neuen Apparates erfordert hätte. Im allgemeinen war die Temperatur des Arbeitsraumes, in welchem die Messungen ausgeführt wurden, sehr konstant. Er hatte eine Durchschnittstemperatur von 15° C. Unter diesen Umständen war der Nullpunkt der Einstellung meist tagelang konstant und variierte nur dann ganz allmählich, wenn man das Quecksilber ausfliessen und dann wieder auspumpen liess, wahrscheinlich infolge mechanischer Deformationen; denn der Nullpunkt ging nach und nach wieder auf seine alte Lage zurück. Indessen war es auch hier immerhin möglich, während einer Zeitdauer von ca. 3 Stunden noch brauchbare Messungen zu machen*).

*) Anmerkung: Anfangs wurden nach Angaben von Prof. Paschen mit einem Apparate Versuche gemacht, der auf einem anderen Prinzip beruhte. Die Röhren r liefen nicht in eine Röhre zusammen, sondern tauchten einzeln unten in 2 Wägegläser. Sie waren mit einer 0.5 mm weiten, umgebogenen Öffnung versehen, und der Höhenunterschied in den Rohren R wurde durch die Gewichtsdifferenz des ausgeflossenen Quecksilbers bestimmt. Indessen war die Kapillarkraft an den Mündungen so gross, dass beim Abnehmen der Wägegläser sich das Quecksilber stark zurückzog, selbst noch bei Anwendung von weiteren (bis zu 2 mm) Kapillaren. Auch bei Benützung von Platin- und Platinamalgamöffnungen und schliesslich von Glashähnen oberhalb derselben, wobei das Wägeglas stets in gleicher Höhe unter die Öffnung gesetzt, und vor dem Abnehmen jeder Hahn geschlossen wurde, erhielt man so sehr abweichende Gewichtsdifferenzen, dass die Genauigkeit höchstens 0.02 mm betrug. Auch eine andere Methode, den Höhenunterschied dadurch zu bestimmen, dass man die Quecksilberoberflächen mit einem Lichtpunkt

Als Luftpumpe wurde eine solche von Töpler'scher Form, als Galvanoskop ein solches Paschen'scher Konstruktion angewandt. Die Luftpumpe war mit einer Flasche versehen, welche Phosphorsäureanhydrid enthielt. Ihre Kapazität war ungefähr doppelt so gross, wie die des auszupumpenden Raumes. Die Pumpe konnte durch einen Dreiweghahn mit der Luft oder dem Apparatsystem verbunden werden. Der Hahn war indessen auf die Dauer nur in der Stellung vollkommen dicht, wo er die Pumpe mit dem Manometer verband, und zur Einlassung von Gasen wurde an dem Verbindungsrohr zwischen dem Manometer und dem Mc Leod-Apparat ein Hahn angebracht. Sollen Drucke gemessen werden, so wird das Quecksilber in den Barometerverschlüssen gesenkt und ein gutes Vacuum erzeugt; dies geschah ohne besondere Schwierigkeit. Wenn nach längerem Stehen das Quecksilber nur noch eine sehr kleine, nicht mehr auszutreibende Gasblase enthielt, war das Vacuum dem Zweck entsprechend, und das Quecksilber in dem Barometerverschluss, welcher die Platinspitze abschloss, wurde für dauernd gehoben. Das Vacuum über der Spitze hielt sich so lange Zeit. Bei der Pumpe konnte das Quecksilber unten ausfliessen und wurde in Intervallen in das Reservoir gebracht. Alle Teile wurden vor Benützung sorgfältig mit Salpetersäure, Alkohol, zuletzt mit destilliertem Wasser gereinigt und getrocknet; ausserdem standen sie sämtlich während der ganzen Zeit der Messungen mit dem Phosphorpentoxyd der Pumpe in Verbindung. Mittels eines guten Kathetometers wurde die Schraube geaicht, d. h. die Projektion der Ganghöhe auf die Vertikale bestimmt; sie betrug im Mittel: 0.2462 mm, sodass jeder Ablesungswert mit der Zahl 0.985 zu multiplizieren war.

---

beleuchtete und das Bild (bei gleicher Höhe der Quecksilberspiegel ein Punkt, bei ungleicher zwei Punkte) zur Feststellung der Höhengleichheit benutzte, scheiterte und zwar an den zu grossen Schwankungen, welche das Quecksilber in der empfindlichsten Weise anzeigte.

Versuche zur Prüfung des Mc LEOD'schen Manometers.

Die ersten Versuche wurden mit einem Manometer angestellt, welches in der Kompressionsvorrichtung eine Kugel von 500 cc. und daran anschliessend eine Kapillare von 1 mm Weite hatte. Die ersten vorläufigen Experimente wurden mit Luft gemacht, welche durch ein Chlorcalciumrohr in den Apparat geführt und dort zur Trockne durchs Phosphorpentoxyd der Luftpumpe längere Zeit eingeschlossen wurde. Es zeigte sich indes sehr bald, dass eine Anwendung von langen Schlauchstücken gänzlich unzulässig war, und dass auch zum Trocknen andere Sorgfalt verwendet werden musste, da die auf diese Weise erhaltenen Werte des Manometers immer variierten. Es wurde daher die Luft stets in einem Fläschchen mit Phosphorsäureanhydrid eingeschlossen, dessen Ableitungsrohr direkt an das Zuströmungsrohr des Manometers stiess, und nur da stellte ein ganz kurzes Gummistück die vollständige Verbindung her. Bei dieser Anordnung ergab das Manometer stets konstante Werte, die aber von den Schraubenwerten noch um Beträchtliches abwichen. Erst als der Teil des Apparates von der Gabelung des Barometerrohres bis zur Kapillaren mit einer die Wärme gleichmässig verteilenden Schutzhülle aus Watte und Kupferblech umgeben wurde, erhielt man Resultate, welche bei Drucken zwischen 0.1 mm und 0.01 eine Übereinstimmung auf weniger als 4% mit dem neuen Manometer aufwiesen. Sie sind nicht aufgeführt, weil es sich nicht als sicher erwies, ob die vorhandene Volumteilung des Manometers zuverlässig war; sie war nicht mehr zu kontrollieren, weil das Manometer unglücklicherweise schon nach den ersten Messungen defekt wurde. Man gab dem neu konstruierten Apparate, um gleichzeitig grössere und kleinere Drucke messen zu können, die Form von Fig. 3. Die Kapillare bestand aus zwei Teilen, einem weiteren K_1 zur Messung von grösseren Drucken und einem engeren K_2 zur

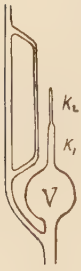

Fig. 3.

Messung von sehr kleinen Drucken. K_2 war innen ca. 0.7 mm weit, während K_1 einen Durchmesser von etwa 10 mm hatte. Die Kugel mit den Kapillaren wurde wie bei dem vorigen Apparate kalibriert angekauft. Die ersten exakten Messungen zeigten indessen, dass die Kapillare K_2 nicht richtig geaicht war, und es wurde die Kalibrierung nochmal ausgeführt in der Weise, wie sie bei der nächsten Manometerform beschrieben ist, wobei sich als Inhalt statt 0.1 cc. das Volum 0.07 cc. herausstellte. Die sämtlichen Messungswerte wurden danach umgerechnet. Der Inhalt der Kapillaren K_1 war 1.5 cc., der der Kugel V 500 cc. Von den Kapillaren war jede 8 cm lang. Das Steigrohr S hatte eine Länge von 35 cm und war in mm geteilt. Ferner wurde jetzt an den Hahn, durch welchen man das Gas einströmen liess, ein Trockengefäss von Form der Fig. 4 angeblasen, um vollständig ohne Gummischlauch zu arbeiten. Das Rohr wurde durch den Schliff S mit Phosphorpentoxyd gefüllt; es hatte 3 Hähne. Durch H_1 liess man die Luft hinein und bewahrte sie über dem Phosphorpentoxyd auf, H_3 war immer geschlossen. Der Hahn H_2 liess das vollkommen trockene Gas in das Apparatsystem. Bei dieser Anordnung wurden vergleichende Messungen von einem Millimeter abwärts bis zu wenigen Tausendstelmillimetern gemacht. Dabei wurden Einstellungen des Manometers bei möglichst verschiedenen Kompressionen zur Ausführung gebracht, um gleichzeitig zu ermitteln, in welcher Weise das Manometer in sich funktioniert. Die Messungen bei Einstellung in den weiteren Kapillaren wurden mit Hilfe eines Kathetometers ausgeführt. Die Werte sind in Tabelle I Seite 19 zusammengestellt. Die linke Seite derselben repräsentiert die Schraubenwerte, erst in Scalenteilen dann in mm Quecksilber; die rechte, die des Ma-

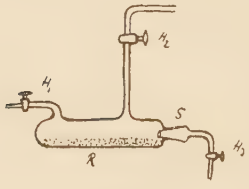

Fig. 4.

Tabelle I.

Verhalten der Schraube und des Manometers in Luft.

Schraube		Manometer			
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in mm	Volum in ccm	Druck in mm Hg	
0.7395	0.7284	33.19	1.124	0.7461	
		35.64	1.045	0.7449	
0.5635	0.5551	25.16	1.129	0.5681	
		27.37	1.037	0.5677	
0.1876	0.1848	8.83	1.112	0.1964	
		11.28	0.9102	0.2053	
0.0358	0.0353	1.69	1.06	0.0358	
		24.0	0.0693	0.0332	Kapillare K_2
		25.8	0.0646	0.0333	
0.030	0.0296	1.498	0.956	0.0286	
		2.082	0.0673	0.0280	Kap. K_2
		22.92	0.0613	0.0281	
		27.35	0.0514	0.0280	
0.0219	0.0216	0.842	1.227	0.0207	
		1.411	0.789	0.0207	
		16.215	0.063	0.0205	Kap. K_2
		18.215	0.056	0.0204	
0.0143	0.0141	0.899	0.825	0.0140	
		1.660	0.431	0.0143	
		10.01	0.0648	0.0131	Kap. K_2
		11.77	0.0616	0.0145	
		13.60	0.0476	0.0130	
		17.62	0.0366	0.0129	
		22.31	0.0291	0.0130	
		24.81	0.0260	0.0129	
0.0075	0.0074	0.579	0.881	0.0102	
		7.11	0.0686	0.0098	Kap. K_2
		10.37	0.0483	0.0099	
		14.27	0.0357	0.0102	
		18.75	0.0267	0.0100	
		23.72	0.0210	0.099	
0.0060	0.0059	0.303	0.833	0.005048	
		3.78	0.0644	0.00487	Kap. K_2
		6.60	0.0378	0.00578	
		10.43	0.0238	0.00497	

nometers, und zwar zeigt hier die erste Kolonne den Überdruck der komprimierten Luft über die ursprüngliche an, die zweite das Valum, auf welches komprimiert worden ist und die dritte den hieraus berechneten Druck, ebenfalls in mm Quecksilber. Bei den Drucken bis zum halben Millimeter herunter zeigt sich eine durchschnittliche Abweichung von den Schraubenwerten um ca. 2 %, die aber ausserhalb der Messungsfehler liegt. Allmählich, je mehr man zu kleineren Drucken übergeht, erhält man grössere Abweichungen (bis zu 0.01 mm von etwa 5 %) wie aus der Tabelle ersichtlich ist. Bei solchen kleinen Drucken zeigt indes auch das Manometer in sich keine Konstanz der Werte mehr an; vielmehr werden diese um so abweichender von den Schraubenwerten, je mehr man in die Kapillare K_2 hineinkomprimiert; bei einem Druck von 0.0141 mm weichen die Ergebnisse des Manometers bis zu mehr als 7 % von einander ab, $p\,v$ ist also in demselben Masse nicht mehr konstant. Die Werte des Manometers sind um so eher brauchbar, je weniger man komprimiert und sind am wenigsten oder gar nicht zu verwenden, wenn das Gas in die Kapillare K_2 gepresst wird; hier in der Regel treten die Abweichungen am stärksten auf, wie dies bei späteren Versuchen noch intensiver gezeigt werden kann.

Hierauf wurden Versuche mit anderen Gasen angestellt und zwar zunächst mit Kohlendioxyd. Das in Fig. 4 skizzierte Trockengefäss wurde zu dem Zwecke durch die Hähne H_1 und H_3 verschlossen; H_2 wurde geöffnet und mit der Luftpumpe der ganze Raum luftleer gepumpt; wenn nach einigem Warten sich das Vacuum gehalten hatte, konnte man das Kohlensäuregas einströmen lassen und durch wiederholtes Auspumpen und Nachströmenlassen luftfrei machen, alsdann zu den Messungen verwenden. Wie zu erwarten, waren die Abweichungen der Resultate grösser als bei Luft. Bis zu einem Druck herab von nahezu 0.1 mm weichen die Werte der beiden Druckmesser um 4 % von einander ab, dann aber immer mehr und bei einem

Druck von 0.0560 mm ist bereits ersichtlich, dass auch der Manometerwert in sich um nahezu 4 % verschieden ist; bei 0.0270 mm variiert er an stärkster Stelle um 3 %; bei den darauffolgenden Messungen von Drucken unterhalb 0.01 mm ergeben indessen Anwendungen der Kapillaren K_2 enorme Abweichungen von dem Schraubenwert, wie die letzten Ergebnisse der Tabelle II zeigen.

Tabelle II.

Verhalten der Schraube und des Manometers in Kohlensäure.

Schraube		Manometer			
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg	
0.7441	0.7330	33.51	1.135	0.7608	
		36.11	1.053	0.7605	
0.5192	0.5114	22.84	1.1599	0.5299	
		25.08	1 053	0.5282	
0.1691	0.1666	8.31	1.038	0.1725	
		10.293	0.847	0.1743	
0.1181	0.1163	5.601	0.872	0.1259	
		7.201	1.112	0.1254	
0.0613	0.0604	2.812	0.8007	0.0639	
		3.992	1.124	0.0632	
0.0568	0.0560	2.661	1.111	0.0591	
		4.004	0.766	0.0613	
0.0274	0.0270	1.686	0.9	0.0304	
		1.735	0.874	0.0303	
		23.895	0.0655	0.0313	Kap. K_2
		26.115	0.0595	0.0311	
0.009	0.0089	0.390	1.173	0.0092	
		10.06	0.0567	0.0121	Kap. K_2
0.0019	0.0019	0.100	1.127	0.0023	
		3.565	0.0511	0.0036	Kap. K_2

Endlich wurden mit Wasserstoff noch Messungen ausgeführt, die in Tabelle III zusammengestellt sind. Der Wasserstoff wurde hergestellt durch Zersetzung von chemisch reinem Zink durch sehr verdünnte reine Schwefelsäure unter Zuhilfenahme von Platin als Katalysator; zur Beseitigung von Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxyd wurde er vor der Verwendung

Tabelle III.

Verhalten der Schraube und des Manometers in Wasserstoff.

Schraube		Manometer			
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg	
0.7549	0.7436	34.42	1.114	0.7669	
		32.02	1.2	0.7685	
0.2412	0.2376	9.88	1.245	0.2460	
		11.69	1.194	0.2457	
0.1861	0.1833	8.86	1.077	0.1908	
		10.83	0.888	0.1923	
0.0602	0.0593	3.00	1.033	0.0620	
		4.34	0.736	0.0639	
0.0432	0.0426	2.40	0.932	0.0437	
0.0211	0.0206	0.91	1.2	0.0218	
		20.98	0.0567	0.0238	Kap. K_2
0.0042	0.0041	0.275	1.087	0.006	
		7.26	0.053	0.0077	Kap. K_2

durch eine alkalische Lösung von Kaliumpermanganat geleitet und dann in das Trockengefäss gebracht. Die Ergebnisse der Messungen zeigen durchweg eine etwas befriedigendere Übereinstimmung der Druckmesser, hingegen auch Abweichungen ausserhalb der Messungsfehler, was die Vermutung nahe legte, dass der Wasserstoff durch diese Darstellung nicht rein genug erhalten wird; später wurde er auf anderem Wege hergestellt

und dieselben Abweichungen erzielt. Indes bestätigt sich wiederum, dass bei Anwendung der engen Kapillaren der Druckwert die stärkste Anomalie aufweist.

Nach diesen Messungen liess man ein neues Manometer anfertigen, und zwar wurde, um auch die kleinsten Fehler der Kapillarkorrektion zu vermeiden und genauer die Volumina abzugrenzen, der Apparat so gebaut, dass die Rohrteile, in denen Einstellungen erfolgten, alle dieselbe Weite hatten. Man gab dem Kapillarrohr die Gestalt von Fig. 5. Um ein grösseres Volum zu erhalten, wurden drei Rohrstücke von ca. 9 mm innerer Weite und 2 mm Länge durch Kapillaren verbunden, die von demselben Rohr geschnitten waren, welches als enge Kapillare *C* an das letzte Rohrstück angesetzt wurde. Desgleichen wurde das Steigrohr *S* in einer Länge von 35 cm von derselben Röhre geschnitten und auf der Teilmaschine in mm geteilt. Auch die Kapillare *C* wurde in mm geteilt und an den Verbindungsstücken der weiten Rohrstücke Marken eingeätzt. Das Kalibrieren geschah auf folgende Weise: Zunächst wurde der Querschnitt der Kapillaren *C* durch wiederholtes Auswägen mittels Quecksilber bestimmt; die Resultate stimmten auf 0.4 pro mille überein. Auf 1 cm der Kapillaren kam ein mittleres Volumen von 0.01777 cc. Dann wurde die Kapillare an das System der drei Rohrstücke und unten an dasselbe ein Glashahn angeblasen; die Kapillare war oben offen. Man liess dann Quecksilber hineinsaugen und von einer für immer festgelegten Marke der Teilung das Quecksilber bis zu den Marken ausfliessen in ein trockenes Wägeglas. Die Volumina, welche auf diese Weise mehrmals bestimmt wurden, erwiesen Abweichungen von weniger als 0.1 pro mille. Unterhalb des letzten Rohrstückes waren zwei Marken angebracht, deren unterste die Stelle bedeutete, an welcher der beschriebene Teil des Apparates an die Kugel *V* angeblasen wurde. Die auf genanntem Wege ermittelten Volumina waren bei der Bezeichnung von Fig. 5:

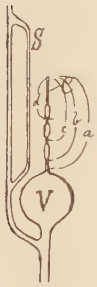

Fig. 5.

$$a = 1.7113 \text{ cc.}$$
$$b = 1.6799 \text{ cc.}$$
$$c = 1.169 \text{ cc.}$$
$$d = 0.60906 \text{ cc.}$$

Die Auswägung der Kapillaren C wurde auch auf diese Art wiederholt und ergab im Mittel genau den Wert, welcher auf die vorherige Weise ermittelt war. Das Volumen der Kugel bis zu dem Ansatze wurde durch Auswägung mit destilliertem Wasser gefunden und betrug 422.2 cc. Das ganze in Rechnung kommende Volum war somit

$$\begin{array}{r} 422.2 \\ 1.7113 \\ \hline 423.9113 \text{ cc.} \end{array}$$

An dem Schlauch, welcher zu dem Quecksilberbehälter führte, war eine Druckschraube angebracht für die feine Einstellung auf die Marken, ähnlich wie sie Rayleigh verwandte. Mit diesem Apparate wurden jetzt die weiteren Untersuchungen angestellt. Zu jeder Druckmessung wurden möglichst viele Einstellungen benutzt. Selbst die kleinsten Drucke konnten bei Einstellung auf die grossen Volumina b, c, d berechnet werden, da die Differenz der Quecksilberhöhen in dem Steigrohr und dem genannten Teile des Manometers immer kathetometrisch bestimmt wurde. Nur bei grösseren Drucken war dies, wenn die Projektion der Marken auf das Steigrohr bekannt war, entbehrlich. Zunächst wurden wieder Versuche mit Luft angestellt. Sie sind in derselben Weise wie früher in Tabelle IV geordnet. Die Abweichungen sind in demselben Masse wie früher. Wiederum treten dieselben in verstärktem Masse auf, sobald die Luft bis in die Kapillare komprimiert wird und zwar hier in anderem Sinne als früher. In der Kapillaren selbst sind die Werte und somit auch $p\,v$ konstant. Verschiedene Druckeinstellungen auf die gleiche Marke ergeben stets denselben Wert; auch tritt nach längerer Wartezeit keine Änderung einer Einstellung ein.

Tabelle IV.

Verhalten der Schraube und des Manometers in Luft.

Schraube		Manometer			
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg	
0.9569	0.9426	24.32	1.6799	0.967	
0.8047	0.7926	20.36	1.6799	0.8098	
		29.53	1.169	0.8164	
0.5236	0.5158	13.36	1.6799	0.530	
		19.43	1.169	0.537	
0.4039	0.3979	10.21	1.6799	0.405	
		14.96	1.169	0.412	
		28.61	0.60906	0.411	
0.0971	0.0957	2.16	1.6799	0.08558	
		3.53	1.169	0.09732	
		6.80	0.60906	0.09768	
0.0807	0.0795	1.96	1.6799	0.07766	
		3.03	1.169	0.08354	
		5.72	0.60906	0.08267	
0.0736	0.0725	1.89	1.6799	0.07488	
		2.83	1.169	0.07802	
		5.43	0.60906	0.07782	
0.0408	0.0402	0.82	1.6799	0.03249	
		1.49	1.169	0.04108	
		2.93	0.60906	0.04209	
		18.25	0.10094	0.04344	Kapillare
		22.71	0.08156	0.04369	
0.0396	0.0390	0.945	1.6799	0.03744	
		1.451	1.169	0.03988	
		2.917	0.60906	0.04190	
		17.77	0.1027	0.04305	Kapillare
		20.07	0.09205	0.04357	
		22.29	0.08228	0.04323	
0.0174	0.0171	0.47	1.6799	0.01862	
		0.77	1.169	0.02123	
		1.51	0.60906	0.02169	
		10.06	0.09916	0.02353	
		11.89	0.08334	0.02337	Kapillare
		18.42	0.05402	0.02347	
		20.83	0.04780	0.02348	
0.0016	0.0016	0.07	1.6799	0.00118	
		0.23	1.169	0.00269	
		0.41	0.60906	0.00250	
		3.81	0.08228	0.00314	
		7.05	0.04425	0.00312	Kapillare
		11.56	0.02666	0.00308	
		16.50	0.01919	0.00318	

Der zu den darauffolgenden Experimenten benutzte Wasserstoff wurde wie bei den Versuchen von Willy Wien elektrolytisch hergestellt. In ein grösseres Wassergefäss W (Fig. 6) tauchte ein cylindrisches Glasrohr G von 20 cm Länge, welches oben in ein engeres mit Hahn versehenes Rohr endigte. Letzteres war an das Trokkengefäss angeblasen. Das Wasser wurde mit reiner Schwefelsäure wenig angesäuert und vor Gebrauch zur Austreibung der Kohlensäure eine Zeit lang ausgekocht. Von den Elektroden tauchte eine unter das Rohr G, die andere in das Gefäss W. Der Strom wurde zwei Akkumulatoren entnommen und die Wasserzersetzung durch einen Widerstand reguliert. Mit dem so erhaltenen und vorsichtig getrockneten Wasserstoff stellte man neue Versuche an, die bald die Abweichungen bei dem vorigen Manometer bestätigten.

Fig. 6.

Tabelle V repräsentiert die Ergebnisse. Nach diesen Messungen wurden mit Luft noch einmal etliche ausgeführt

Tabelle V.

Verhalten der Schraube und des Manometers in Wasserstoff.

Schraube		Manometer		
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg
0.7874	0.7756	20.23	1.6799	0.8047
		29.40	1.169	0.8122
0.7288	0.7179	18.36	1.6799	0.7302
		26.82	1.169	0.7414
0.3810	0.3753	12.09	1.6799	0.3814
		17.82	1.169	0.3912
0.3504	0.3452	0.75	1.6799	0.276
		12.78	1.169	0.281
		24.68	0.60906	0.282
0.2532	0.2494	6.25	1.6799	0.2488
		9.20	1.169	0.2545
		17.72	0.60906	0.2547

Verhalten der Schraube und des Manometers in Wasserstoff.

(Fortsetzung von Tabelle V.)

Schraube		Manometer			
Druck in Scalenteilen	Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg	
0.226	0.2226	5.70	1.6799	0.1805	
		8.36	1.169	0.1839	
		16.03	0.60906	0.1836	
0.1203	0.1185	2.88	1.6799	0.09085	
		4.38	1.169	0.09614	
		8.38	0.60906	0.09584	
0.0610	0.0601	1.30	1.6799	0.0410	
		2.12	1.169	0.0465	
		4.12	0.60906	0.0471	
0.0190	0.0187	0.412	1.6799	0.01293	
		0.67	1.169	0.0147	
		1.23	0.60906	0.0141	
		7.58	0.1048	0.0149	Kapill.
		11.24	0.0723	0.0152	
		17.87	0.0451	0.0152	

(zur Kontrolle wurden diese Wiederholungen stets angestellt), wodurch sich plötzlich ganz andere Resultate ergaben. Die Werte des Manometers waren stets um ein Bedeutendes zu klein, und die Vermutung lag nahe, dass die Luft noch nicht trocken war, infolgedessen bei der Kompression mit Wasserdämpfen gesättigt und endlich dadurch der von dem Manometer angezeigte Druck zu klein wurde. Die Luft wurde aus diesem Grunde ebenso lange als bei den früheren Versuchen über dem Phosphorpentoxyd aufbewahrt. Aber die Werte blieben stets so beträchtlich von den Schraubenwerten verschieden, wie dies die folgenden zwei Beispiele zeigen:

Schraube	Manometer		
Druck in mm Hg	Überdruck des kompr. Gases in cm	Volum in ccm	Druck in mm Hg
0.314	8.06	1.6799	0.254
	11.77	1.169	0.258
	22.59	0.60906	0.258
0.115	2.84	1.6799	0.0896
	4.34	1.169	0.0953
	8.37	0.60906	0.0957

Die Erklärung, weshalb die Werte der Schraube und des Manometers in dieser Weise differieren, ist recht schwieriger Art. Bei nicht ausserordentlich kleinen Drucken ist die Abweichung gering und eine Messung mit dem Mc Leod'schen Apparate in der durch die Messungen definierten Weise wohl möglich. Bei kleinen Drucken aber kann von dem Mc Leod'schen Manometer höchstens bei Vermeidung von engen Kapillarröhren Gebrauch gemacht werden. Ob indessen der Einfluss der Kapillaren ein Grund für die auftretenden Anomalien ist, oder ob bei diesen gewaltigen Kompressionen das Boyle'sche Gesetz versagt, darüber muss man sich zunächst ausschweigen. Eine Gasadsorption könnnte derartige Abweichungen, wie sie meist auftraten einigermassen begreiflich machen. Eine Verdichtung an der Oberfläche des Glases war indessen nie zu konstatieren. Wenn man aber bedenkt, dass die Unterschiede der beiden Messungen bei grösseren Drucken eine geringe Grösse erreichen, meist nur wenige Prozent betragen, dass ferner die Versuche unter den grössten Vorsichtsmassregeln angestellt werden müssen, so ist, von den letzten Messungen in Luft abgesehen, das Ergebnis nicht so sehr unbefriedigend. Für geringe Kompressionen hat Rayleigh die Gültigkeit des Boyle-schen Gesetzes bei sehr kleinen Drucken bis zu 0.01 mm erwiesen. Es lag daher nahe, die Versuche Rayleigh's auf das neue Manometer zwecks Untersuchung seiner Brauchbarkeit in

ähnlicher Weise anzuwenden. Gegebenenfalls mussten Rayleigh's Resultate bestätigt werden, und dies war in der Tat der Fall.

Prüfung des neuen Manometers.

Rayleigh stellte Untersuchungen über das Boyle'sche Gesetz in Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff an, indem er bei jedem Drucke das Gas in Intervallen auf das zwei- bis vierfache komprimierte und fand völlige Gültigkeit des Gasgesetzes für die genannten Gase zwischen 1.5 und 0.01 mm. Im folgenden wurde in diesem Sinne ausser Wasserstoff und Sauerstoff auch die Luft untersucht. Statt des Manometers wurde ein Kugelsystem von der Form der Figur 7 an das Schraubenmanometer angeblasen. Die drei Kugeln hatten einen Durchmesser von ca. 6 cm und waren durch 12 mm weite Rohre miteinander verbunden. Bei den bezeichneten Stellen *(1, 2, 3, 4)* waren Marken eingeätzt und die Volumina *a*, *b*, *c* wie in der früheren Weise durch Auswägen mit Quecksilber kalibriert. Die Volumina waren bei der Bezeichnung der Figur:

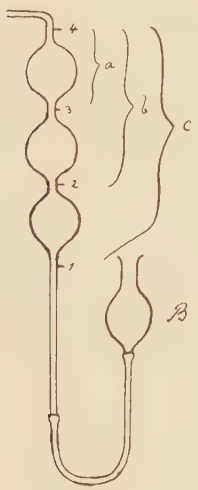

Fig. 7.

$$a = 143.52 \text{ cc.}$$
$$b = 284.16 \text{ cc.}$$
$$c = 425.40 \text{ cc.}$$

Unten endigte das System in ein Rohr von Barometerlänge, welches durch einen Schlauch mit einem hebbaren Quecksilberbehälter *B* in Verbindung stand. Das ganze war auf einem Holzbrett mit Lagern aus Zinkblech und Kork befestigt. Mittels des Behälters *B* konnte das Quecksilber roh, durch eine gleiche Druckvorrichtung wie bei dem letzten Mc Leod-Manometer fein auf die Marken eingestellt werden. Auf diese Weise wurde das Gas auf das zwei- bis dreifache komprimiert. Um das Volum zu bestimmen,

welches der Raum des Manometers (bis zur Pumpe, welche jetzt abgeschlossen blieb) einschloss, nahm man, wie dies auch Rayleigh tat, das Boyle'sche Gesetz als giltig an. Dann machte man Druckmessungen bei den Einstellungen der vier Marken und hatte dadurch drei Gleichungen zur Berechnung des unbekannten Raumes x. Der Genauigkeit wegen ist es am rationellsten, diese durch Vergleich der Produkte $p\,v$ bei Einstellung auf die erste und vierte, auf die zweite und vierte und auf die dritte und vierte Marke zu bilden. Da die Werte von x um so genauer bestimmt sind, je weiter die Einstellungen auseinanderliegen, hat die erste der drei genannten Einstellungen einen dreimal grösseren, die zweite ebenso einen zweimal grösseren Wert als die dritte und mit Rücksicht hierauf wurde, ähnlich wie im folgenden geschah, dass Mittel aus den erhaltenen Zahlen von x gebildet; es ist unterhalb jeder Tabelle angegeben. Da ferner die Genauigkeit der Bestimmung des unbekannten Volumens auch von dem zur Untersuchung gewählten Druck abhängt, ist dieser Bestimmung von x um so mehr Gewicht beizulegen, je genauer der Druck mit der Schraube bestimmt werden konnte. Da die Fehler der Schraubenmessung mit kleiner werdendem Druck prozentisch grösser werden, ist bei Berechnung des endgültigen Mittelwertes von x aus den verschiedenen nach den einzelnen Tabellen gefundenen Mittelwerten den letzteren im Verhältnis des angewandten Druckes Wert beigelegt worden. So wurden die Werte x unter den verschiedenen Tabellen mit den im folgenden nebenstehenden Zahlen multipliziert ehe man das Mittel nahm:

	Luft		Wasserstoff		Sauerstoff	
I.	184.91 cc.	· 24;	184.45 cc.	· 10;	183.9 cc.	· 14
II.	195.72 cc.	· 4;	194.96 cc.	· 1;	188.31 cc.	· 1
III.	189.95 cc.	· 2;				
IV.	204.92 cc.	· 1;				
	5805.54 cc.	: 31;	2039.46 cc.	: 11;	2762.91 cc.	: 15
	187.28 cc.		185.37 cc.		184.19 cc.	

Mittel: x = 185.61 cc.

Prüfung des neuen Manometers. Luft.

Tabelle I. Druck: 0.7673 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	$p\,v$	Anfangsdruck $p$ber. aus $p\,v$
x + 425.4	0.7673	468.83	0.7673
x + 284.16	0.9998	469.67	0.7687
x + 143.52	1.4222	468.08	0.7661
x	2.5320	469.96	0.7692

Mittleres x = 184.91 cc.

Tabelle II. Druck: 0.1241 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	$p\,v$	Anfangsdruck $p$ber. aus $p\,v$
x + 425.4	0.1241	75.83	0.1241
x + 284.16	0.1607	75.49	0.1236
x + 143.52	0.2276	74.91	0.1226
x	0.3940	73.13	0.1197

Mittleres x = 195.72 cc.

Tabelle III. Druck: 0.06698 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	$p\,v$	Anfangsdruck $p$ber. aus $p\,v$
x + 425.4	0.06698	40.93	0.06698
x + 284.16	0.08767	41.18	0.0674
x + 143.52	0.1239	40.78	0.0667
x	0.2177	40.41	0.0661

Mittleres x = 189.95 cc.

Tabelle IV. Druck: 0.032 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	$p\,v$	Anfangsdruck $p$ber. aus $p\,v$
x + 425.4	0.032	19.55	0.032
x + 284.16	0.0408	19.17	0.0314
x + 143.52	0.0546	17.97	0.0294
x	0.0968	17.97	0.0294

Mittleres x = 204.92 cc.

Der so erhaltene Wert von x ist in v bei den Tabellen enthalten. In der ersten Kolonne derselben ist das Volumen angegeben, bei welchem der Druck gemessen ist, in der zweiten der mit der Schraube gemessene Druck, in der dritten das Produkt der beiden Ergebnisse und in der vierten der Druck, berechnet aus den vier Produkten $p\,v$. Die Tabellen (S. 31) und die Zusammenstellung S. 30 zeigen, dass sich in allen drei Gasen annähernd auf 1 Prozent dasselbe mittlere Volum x ergibt. Die Konstanz des Produktes $p\,v$ ist aus der dritten Kolonne ersichtlich; bei einem Druck von 0.7673 mm stimmen die Werte von $p\,v$ auf weniger als 0.5 Prozent überein; bei den folgenden Drucken von 0.1241 mm und 0.06698 mm weichen sie im Maximum um 3 Prozent von einander ab, und erst der Druck von 0.032 mm bringt bei $p\,v$ Werte, die bis zu 7 Prozent von einander differieren. Die Erklärung der Schwankungen liegt in den sich mit abnehmendem Druck prozentisch steigernden Fehlern der Druckmessung. Das gleiche gilt von der Genauigkeit, mit der man vermittels der Schraube messen kann. Sie ist durch die Zahlen der letzten Kolonne charakterisiert. Der erste der oben genannten Drucke ist auf weniger als 0.5 Prozent, der zweite und dritte sind durchschnittlich auf 2 Prozent und der kleinste auf ca. 5 Prozent genau bestimmt. Was das Boyle'sche Gesetz anbetrifft, so darf es nach den beschriebenen Messungen für Luft in einem Druckbereiche von 1 mm bis 0.01 mm als gültig erachtet werden.

Die Messungen erstrecken sich noch auf Wasserstoff und Sauerstoff, die elektrolytisch hergestellt wurden. Sie sind im wesentlichen jedoch nur eine Messungsreihe nach der Methode von Rayleigh und deshalb wurden auch für jedes Gas nur zwei konvenierende Drucke gewählt. Die resultierenden Werte sind in den S. 33 stehenden Tabellen zum Ausdruck gebracht. Auch hier ist das Produkt $p\,v$ bei jeder Messung, sowohl in Wasserstoff wie in Sauerstoff stets konstant, und die von Bohr*)

*) W. A. 27, 459; 1886.

Prüfung des neuen Manometers. Wasserstoff.

Tabelle I. Druck: 0.4667 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	pv	Anfangsdruck $p$ber. aus pv
x + 425.4	0.4667	285.16	0.4667
x + 284.16	0.6084	285.79	0.4675
x + 143.52	0.8677	284.59	0.4674
x	1.5434	286.47	0.4688

Mittleres x = 184.45 cc.

Tabelle II. Druck: 0.0463 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	pv	Anfangsdruck $p$ber. aus pv
x + 425.4	0.0463	28.29	0.0463
x + 284.16	0.0593	27.86	0.0456
x + 143.52	0.0847	27.88	0.0456
x	0.1467	27.23	0.0446

Mittleres x = 194.96 cc.

Prüfung des neuen Manometers. Sauerstoff.

Tabelle I. Druck: 0.6635 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	pv	Anfangsdruck $p$ber. aus pv
x + 425.4	0.6635	405.41	0.6635
x + 284.16	0.8643	405.97	0.6644
x + 143.52	1.2361	406.84	0.6659
x	2.1989	408.14	0.6679

Mittleres x = 183.9 cc.

Tabelle II. Druck: 0.0444 mm.

Volum in ccm	Druck in mm Hg	pv	Anfangsdruck $p$ber. aus pv
x + 425.4	0.0444	27.13	0.0444
x + 284.16	0.0570	26.78	0.0438
x + 143.52	0.0816	26.86	0.0440
x	0.1439	26.71	0.0437

Mittleres x = 188.31 cc.

aufgefundene Anomalie des Sauerstoffes bei 0.7 mm Druck erweist sich wie bei Rayleigh's Messungen als nicht vorhanden. Die in diesen Tabellen zusammengestellten Resultate ergeben somit in Summa eine Bestätigung der Ergebnisse Rayleigh's. Gleichzeitig ist hiermit die Zuverlässigkeit des neuen Manometers, wie es von Professor Paschen theoretisch ausgearbeitet war, erwiesen. Von der Genauigkeit desselben legen die nachfolgenden Messungsreihen S. 35 Zeugnis ab, welche im Prinzip eine Weiterführung der letzten Messungen in Luft sind. In der ersten Kolonne der Tabellen ist wie früher das Volumen angegeben, bei welchem der Druck gemessen ist; nur ist hier für x der auf S. 31 bestimmte endgültige Wert direkt eingesetzt; in der zweiten steht der hierbei mit der Schraube beobachtete Druck und in der dritten der aus der Bildung der vier Produkte $p\ v$ berechnete Anfangsdruck p. Da sich für diesen Anfangsdruck, wie aus der letzten Kolonne ersichtlich, bei jeder Kompression derselbe Wert ergibt, ist es bei kleinen Drucken dadurch möglich die Genauigkeit zu erhöhen und Druckmessungen auch unterhalb 0.001 mm zu gestatten, dass man den Druck durch die beschriebene Kompression vergrössert. Die letzten Kolonnen der letzten Tabellen, sowie die der folgenden zeigen dies. Diese enthalten Messungen, welche bei noch kleineren Drucken mit dem letzten Apparate ausgeführt worden sind.

Soweit die Frage über das Mc Leod'sche Manometer durch die erledigten Messungen geregelt werden kann, ist das Ergebnis derart: Bei Anwendung von nicht zu engen Kapillaren (etwa 10 mm im Durchmesser) und sorgfältig getrockneten Gasen kann bei einer Genauigkeit auf einige Prozente für Drucke zwischen 1 mm und 0.05 mm und zwar für die Gase, Luft, Wasserstoff und Kohlensäure von dem Mc Leod'schen Apparate Gebrauch gemacht werden. Unter den genannten Umständen scheint eine Messung des Druckes auch noch unterhalb dieser Grenze bis zu einem gewissen Grade möglich. Derartige Abweichungen jedenfalls, wie sie bei Baly und Ramsay auf-

Prüfung der Genauigkeit des neuen Manometers.
Luft.

Tabelle I. Druck: 0.0099 mm.

Volum in ccm	p in mm Hg	Anfangsdruck p
611.01	0.0099	0.0099
469.77	0.0138	0.0106
329.13	0.0197	0.0106
185.61	0.0355	0.0108

Tabelle II. Druck: 0.005 mm.

Volum in ccm	p in mm Hg	Anfangsdruck p
611.01	0.005	0.005
469.77	0.0068	0.0052
329.13	0.0081	0.0044
185.61	0.0149	0.0045

Tabelle III. Druck: 0.0048 mm.

Volum in ccm	p in mm Hg	Anfangsdruck p
611.01	0.0048	0.0048
469.77	0.0068	0.0052
329.13	0.011	0.0059
185.61	0.017	0.0052

traten, sind unter den beschriebenen Bedingungen und für den untersuchten Druckbereich nicht bei den kleinsten Drucken wahrgenommen worden. Auf jeden Fall jedoch hat sich das neue Manometer gut bewährt bis zu Drucken von etwa 0.001 mm.

Vorliegende Untersuchungen wurden auf Anregung und unter Leitung des Herrn Professor Dr Paschen im physikalischen Institute der Universität Tübingen ausgeführt.

Ich möchte hierbei nicht versäumen, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr Paschen, meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen für das mir erwiesene Wohlwollen und die liebenswürdige Unterstützung bei der Ausführung meiner Arbeit.

Zugleich sei es mir gestattet, dem Assistenten des Tübinger Institutes, Herrn Privatdozent Dr Gans für das grosse Interesse, welches er meiner Arbeit entgegenbrachte verbindlichst zu danken.